



RELATIONSHIP BETWEEN THE PALEOZOIC AND CENOZOIC FAULTING ENSEMBLES IN THE WESTERN PART OF THE ALTAI-SAYAN FOLDED AREA

I.S. Novikov ¹✉, I.D. Zolnikov ^{1,2}, N.V. Glushkova ^{1,2}, D.A. Danilson ^{1,2}, K.K. Kolesov ^{1,2}

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. Fault structures in folded areas are an important element of the geological structure. Their age and history of development affect seismicity, distribution of minerals, and engineering and geological characteristics of the area. The geological structure of the Altai-Sayan folded area was mainly formed during the Paleozoic and transformed during the Cenozoic activation. Geoinformation methods and technologies were used to compare between the Paleozoic and Cenozoic fault networks. It is shown that the degree of reactivation of the Paleozoic faults varies greatly within the territory.

Conjugate analysis of the orientation and spatial distribution of faults of different ages in the study area does not confirm that the Cenozoic fault system was formed by reactivation or inherited development of the Paleozoic fault system. These two systems arose at different compression orientations. The left-lateral strike-slip ensemble was formed under sublatitudinal compression in the Paleozoic, and the right-lateral strike-slip ensemble – under submeridional compression in the Cenozoic. A significant coincidence between the directions of the main faults of different ages is due to their dominant strike along the boundaries of the accretionary complexes in the region.

KEYWORDS: Altai-Sayan folded area; fault boundaries; neotectonic activation; Cenozoic faults; GIS technologies

FUNDING: The work was done on the topics of research of IGM SB RAS (122041400214-9 and 122041400252-1), with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Igor S. Novikov, novikov@igm.nsc.ru

Received: December 21, 2022

Revised: February 7, 2023

Accepted: February 15, 2023

FOR CITATION: Novikov I.S., Zolnikov I.D., Glushkova N.V., Danilson D.A., Kolesov K.K., 2023. Relationship between the Paleozoic and Cenozoic Faulting Ensembles in the Western Part of the Altai-Sayan Folded Area. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (3), 0705. doi:10.5800/GT-2023-14-3-0705

СООТНОШЕНИЕ РАЗЛОМНЫХ АНСАМБЛЕЙ ПАЛЕЗОЙСКОГО И КАЙНОЗОЙСКОГО ВОЗРАСТА НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

И.С. Новиков¹, И.Д. Зольников^{1,2}, Н.В. Глушкова^{1,2}, Д.А. Данильсон^{1,2}, К.К. Колесов^{1,2}

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

АННОТАЦИЯ. Разломные структуры в складчатых областях являются важным элементом геологической структуры. Их возраст и история развития влияют на сейсмичность, распределение полезных ископаемых, инженерно-геологические характеристики местности. Геологическая структура Алтае-Саянской складчатой области в основном сформировалась в палеозое, но была преобразована в ходе кайнозойской активизации. Методами геоинформационных технологий проведено сравнение палеозойской и кайнозойской сетей разломов. Показано, что степень реактивации палеозойских разломов сильно варьируется в пределах территории.

Сопряженный анализ ориентировки и пространственного размещения разновозрастных разломов изучаемой территории не подтверждает представление о том, что кайнозойская система разломов формировалась путем реактивации или унаследованного развития палеозойской системы разрывных нарушений. Эти две системы возникли при разных ориентировках сжатия. В палеозое при субширотном сжатии формировался левосдвиговый ансамбль, а в кайнозое в условиях субмеридионального сжатия – правосдвиговый. Существенное совпадение направлений магистральных разломов разного возраста обусловлено их доминирующим простиранием согласно границам аккреционных комплексов региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Алтае-Саянская складчатая область; разломные границы; неотектоническая активизация; кайнозойские разломы; геоинформационные технологии

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена по темам НИР ИГМ СО РАН (122041400214-9 и 122041400252-1) при поддержке Минобрнауки РФ.

1. ВВЕДЕНИЕ

По представлениям, сложившимся в XIX в., считалось, что горный рельеф формировался в эпохи складчатости на месте осадочных бассейнов. В частности, полагалось, что горы Алтае-Саянской складчатой области возникли в позднем палеозое и современные хребты – это не разрушенные до конца антиклинальные складки [Tschihatceff, 1845]. В начале XX в. концепция изменилась и посетивший Алтай В.А. Обручев описал его как результат блоковых движений мезозойского или кайнозойского возраста [Obручев, 1915]. Позднее он определил возраст рельефа Алтая как кайнозойский и даже ввел термин «неотектоника» для обозначения рельефообразующих движений соответствующего возраста [Obручев, 1948]. Долгое время считалось, что мезозой был на рассматриваемой территории временем тектонического покоя, в ходе которого формировалась региональная поверхность выравнивания. Однако к середине XX в. при региональных геологических работах в пределах Алтае-Саянской складчатой области была закартирована и изучена система грабенов юрского возраста, которые были выполнены угленосной моласой и не могли быть ничем, кроме как сохранившимися частями межгорных впадин среднемезозойского возраста. На основе этих данных К.В. Боголепов [Bоголепов, 1967, 1985] выделил в истории Алтае-Саянской горной области этап мезозойского «дейтероорогенеза», хронологически расположенного между классическим

складчатым «протоорогенезом» позднего палеозоя и новейшим горообразованием позднего кайнозоя. Мезозойская активизация имела в значительной степени унаследованный характер от позднепалеозойской, что позволяет рассматривать палеозойско-мезозойскую сеть разломов как одну систему [Novikov et al., 2019, 2022].

В современной парадигме эпохи горообразования в пределах территории Алтае-Саянской складчатой области воспринимаются с позиций плитной тектоники как результат регионального сжатия континентальной коры в связи с коллизионными событиями. Формирование горного рельефа территории в позднем палеозое обычно рассматривается как результат закрытия Туркестанского и Джунгаро-Балхашского палеоокеанов и аккреции Казахстанского и Таримского континентальных блоков к Сибирскому кратону [Şengör et al., 1993; Windley et al., 2007; Seltmann et al., 2011; Liu et al., 2013; и др.]. Мезозойскую эпоху горообразования в настоящее время можно считать следствием закрытия Монголо-Охотского палеоокеана и коллизии Северо-Китайского кратона с Евразией [Cogné et al., 2005; Donskaya et al., 2013; Yang et al., 2015]. Современное горообразование большинство исследователей воспринимают как результат горизонтального сжатия и связывают с коллизией Евразийской и Индо-Австралийской плит. Первыми эту идею сформулировали П. Молнар и П. Тапонье [Molnar, Tapponnier, 1975; Tapponnier, Molnar, 1979].

По мере роста континентальной коры территория Алтае-Саянской складчатой области становилась ареной воздействия все более удаленных от нее коллизионных событий. Менялась также и ориентировка сжимающих усилий вследствие этих воздействий. Анализ влияния древней структуры на характер неотектонической активизации является важной научной задачей, поскольку позволяет определить закономерности реактивации древних разрывных нарушений и условия, при которых вновь образуемая система разломов формируется вне зависимости от уже имеющихся на момент ее возникновения неоднородностей основания. Рассмотрим соотношения древних и новейших разрывных структур на территории западной части Алтае-Саянской горной области (рис. 1).

Тектонические события создали в пределах рассматриваемой территории две системы разломов – палеозойскую, которая была незначительно модифицирована в мезозое, и позднекайнозойскую (рис. 2). Данные системы разломов имеют черты как сходства, так и различия. Целью статьи является анализ соотношения систем разломов палеозойского и кайнозойского возраста. Визуальное сопоставление разломных

сетей разного возраста показывает существенную унаследованность если не самих зон разломов, то по крайней мере их преобладающих направлений во многих регионах. Так, в Западном Саяне явно преобладают разломы северо-восточного направления, а в восточной части Горного и Монгольском Алтае – северо-западного. Вместе с тем отчетливо видны и районы, где преобладающие направления резко различаются. Например, в Рудном Алтае и юго-западной части Горного Алтая палеозойские разломы сохраняют северо-западное направление, а многие кайнозойские имеют юго-западное простирание.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Территория западной части Алтае-Саянской складчатой области к первой половине 60-х годов была покрыта листами Государственной геологической карты масштаба 1:200000. Материалы государственной геологической съемки региона были рассмотрены В.П. Нехорошевым, курировавшим съемку на юге Западной Сибири, в двух монографиях [Nekhoroshev, 1958, 1966]. Позднее по материалам среднемасштабной геологической съемки были составлены карты масштаба 1:500000



Рис. 1. Обзорная карта территории исследования. Контуром выделена территория, показанная на рис. 2.

Fig. 1. Overview map of the study area. Contour lines indicate the area shown in Fig. 2.

[Geological Map..., 1976, 1977] и 1:1000000 [Geological Map..., 1980]. К недостаткам этих карт следует отнести то, что на них не показаны новейшие разломы. Этот недостаток связан со взглядами В.П. Нехорошева на характер неотектонической активизации Алтая, основой которой он считал новейший свод с незначительными осложнениями в виде кайнозойских разломов. Поскольку В.П. Нехорошев курировал по линии Мингео СССР съемку рассматриваемой территории, его влияние выразилось в том, что при составлении карт новейшие разломы игнорировались как несущественные. Для проводимого авторами анализа это обстоятельство благоприятно, поскольку изображенные на геологических картах разломы характеризуют позднепалеозойский структурный план и отсутствует необходимость отсеивать при их оцифровке неотектонические разрывные нарушения.

Представления о том, что современный рельеф Алтая связан с блоковыми движениями кайнозойского возраста, впервые сформулированы в работе [Obruchev, 1915]. В дальнейшем эти представления были существенно уточнены [Devyatkin, 1965; Bogachkin, 1981]. Неотектоническая активизация рассматриваемой территории вступила в главную фазу около 2 млн лет назад [Novikov, Sokol, 2007] и продолжается в настоящее время, о чем свидетельствует высокая сейсмическая активность региона [Goldin et al., 2004; Agatova et al., 2004]. К настоящему времени созданы цифровые модели новейших разрывных нарушений территории [Novikov, 1998; Novikov et al., 2014], детальность которых соответствует масштабу 1:500000, что позволяет использовать эти данные при сравнении их с аналогичными данными о разломах палеозойского структурного плана. Для проведения анализа были оцифрованы разрывные нарушения (рис. 2): древние – с геологических карт масштаба 1:200000, а новейшие – по материалам И.С. Новикова [Novikov et al., 2014].

Границы неотектонических блоков выявляются методами морфотектонического анализа. В рельефе новейшие сдвиги выражены уступами высотой до 200–300 м, прямолинейными долинами и, реже, цепочками мелких горстовых возвышенностей. Новейшие взбросы и надвиги формируются при ориентировке разрывных нарушений перпендикулярно оси регионального сжатия. Они формируют протяженные региональные уступы высотой 500 м и более. На фронте взбросов и надвигов в мезозойских и кайнозойских осадках примыкающих частей жестких блоков часто развиты складки напора. Сбросы и раздвиги не образуют протяженных структур. Они фиксируют локальные зоны растяжения, ориентированные под острым углом к оси сжатия, выражены в рельефе короткими уступами высотой до 500 м, долинами рек изломанной в плане формы и удлиненными озерными впадинами-грабенами.

В настоящее время палеозойские и мезозойские разломы мы видим в глубоком эрозионном срезе. Они представлены зонами катаклазирования и брекчирования пород шириной до 300 м и иногда содержат обломки

милонитов, blastsмилонитов и лиственитов [Buslov, 1992]. Кайнозойские разломы представлены зонами дробления шириной до 300–500 м, на отдельных участках обломки могут быть сцементированы железисто-карбонатными травертинами [Devyatkin, 1965].

Поскольку основной целью исследования являлся анализ сходства и различия ориентировки вышеуказанных групп разломов в пределах Алтае-Саянской складчатой области, для определения азимутальной ориентировки необходимы были прямолинейные элементы. Однако многие разломы являются криволинейными (рис. 3, а). Чтобы снять это противоречие, каждый разлом был разделен на прямые отрезки при помощи процедуры Split Line At Vertices из раздела Data Manager Tools в программном пакете ArcGIS. Эта процедура делит кривую линию на отрезки, ограниченные вертексами (узлы линии, последовательность которых и определяет линейный объект в векторном формате геоданных). Таким образом, каждый разлом был разделен на серию отрезков (рис. 3, б), для которых были рассчитаны азимутальные направления с помощью модуля свободного доступа, размещенного в сети Интернет «Polar Plots and Circular Statistics» для ArcGIS [Jenness, 2014]. С помощью этого же модуля строились роза-диаграммы. В результате были получены значения азимутов в интервале от 0 до 360°. Такая шкала значений является малоприменимой для сравнительного анализа направлений, так как, например, формально разница между значениями 355° и 175° составляет 180°, тогда как они отражают одно и то же направление (рис. 3, в). В связи с этим для расчетов использовалась только восточная полусфера с интервалом значений от 0 до 180°, к которым путем несложных арифметических действий были приведены значения, оказавшиеся в западной полусфере (рис. 3, г, д).

На следующем шаге ГИС-построений было необходимо сравнить густоту проявления разломов двух возрастных генераций. Здесь же отметим, что реализованный в ArcGIS модуль построения плотностных моделей по линейным векторным объектам дает существенно заглубленный генерализованный результат по сравнению с модулем вычисления плотности точечных объектов, поэтому для оптимизации результата векторные линии были пересчитаны в точки. Для этого линейные объекты конвертировались в растр с размером пикселя 200 м (рис. 3, е). Полученные пиксели, соответствующие линейным объектам, конвертировались в точки, которые и использовались для построения плотностных моделей инструментом Kernel Density (плотность ядер) модуля Spatial Analyst Tools (инструменты пространственного анализа). Инструмент «плотность ядер» вычисляет плотность точечных объектов в окрестности определенного радиуса вокруг каждой выходной ячейки, используя Гауссову функцию. При этом для каждой точки подбирается сглаженная изогнутая поверхность, значение которой максимально в местоположении точки и уменьшается с

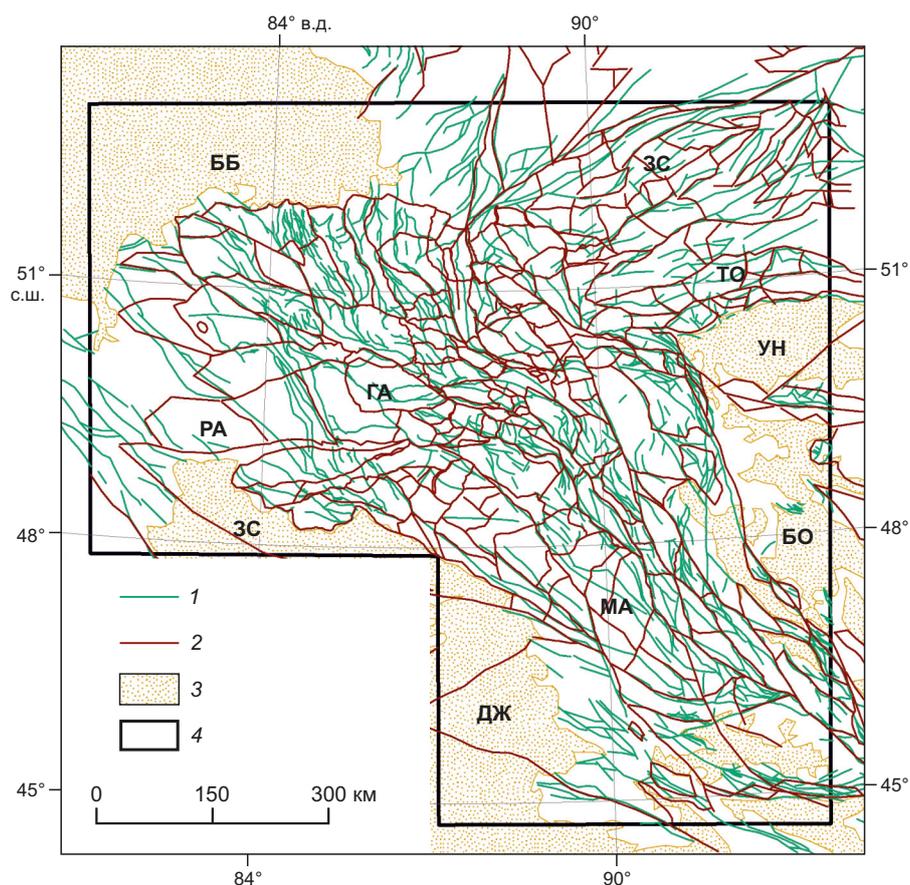


Рис. 2. Схема распределения палеозойских и кайнозойских разломов западной части Алтае-Саянской складчатой области. 1 – палеозойские разломы; 2 – кайнозойские разломы; 3 – кайнозойские впадины с мощным чехлом, перекрывающим палеозойские структуры; 4 – территория, результаты анализа которой показаны на рис. 4 и 5. Элементы современной орографии: впадины: ББ – Бийско-Барнаульская, ЗС – Зайсанская, ДЖ – Джунгарская, УН – Убсунурская, БО – Больших озер; горные сооружения: ГА – Горный Алтай, РА – Рудный Алтай, МА – Монгольский Алтай, ЗС – Западный Саян, ТО – Танну-Ола.

Fig. 2. Scheme of the distribution of Paleozoic and Cenozoic faults in the western part of the Altai-Sayan folded area. 1 – Paleozoic faults; 2 – Cenozoic faults; 3 – Cenozoic depressions with thick sediment cover overlying the Paleozoic structures; 4 – territory whose analysis results are shown in Fig. 4 and Fig. 5. Elements of modern orography: depressions: ББ – Baysk-Barnaul, ЗС – Zaisan, ДЖ – Dzhungar, УН – Ubsu-Nur, БО – Big Lakes; mountain systems: ГА – Gorny Altai, РА – Rudny Altai, МА – Mongolian Altai, ЗС – Western Sayan, ТО – Tannu-Ola.

увеличением расстояния от точки, достигая нуля, когда расстояние от точки равно расстоянию поиска.

Плотностные модели растрового формата строились с радиусом скользящего окна 50 км и с размером выходного пикселя 2 км, что функционально соответствует мелкому картографическому масштабу. Таким образом, в полученных растрах для каждого пикселя было вычислено количество точек, попавших в окружность диаметром 100 км. Эти значения были нормированы на максимальную суммарную длину разломов, попавших в скользящее окно при построении плотностных моделей, отдельно для палеозойского и кайнозойского возраста. В итоге построены плотностные растровые модели палеозойских и кайнозойских разломов.

На следующем этапе решалась задача выявления пространственной локализации повышенной густоты разломов определенных направлений. Для этого необходимо было построить серию поверхностей, в

каждом пикселе которых отражалась бы густота для определенной окрестности разломов выбранного диапазона азимутальной ориентировки. Как для палеозойской, так и для кайнозойской группы разломов были построены четыре плотностных модели, соответствующие азимутальным диапазонам (секторам) следующих направлений: а) субмеридиональное 0–22.5° и 157.5–180°; б) северо-восточное 22.5–67.5°; в) субширотное 67.5–112.5°; г) юго-восточное 112.5–157.5° (рис. 3, ж).

Для построения растровой модели, учитывающей направления одного из четырех вышеуказанных секторов, использовались значения азимутов, рассчитанные для каждой точки после этапа разделения криволинейных объектов на прямые отрезки, как это было указано ранее. В итоге для каждого азимутального сектора построены плотностные модели палеозойских и кайнозойских разломов, а также модулей их разницы. Это позволяет оценить разницу пространственной

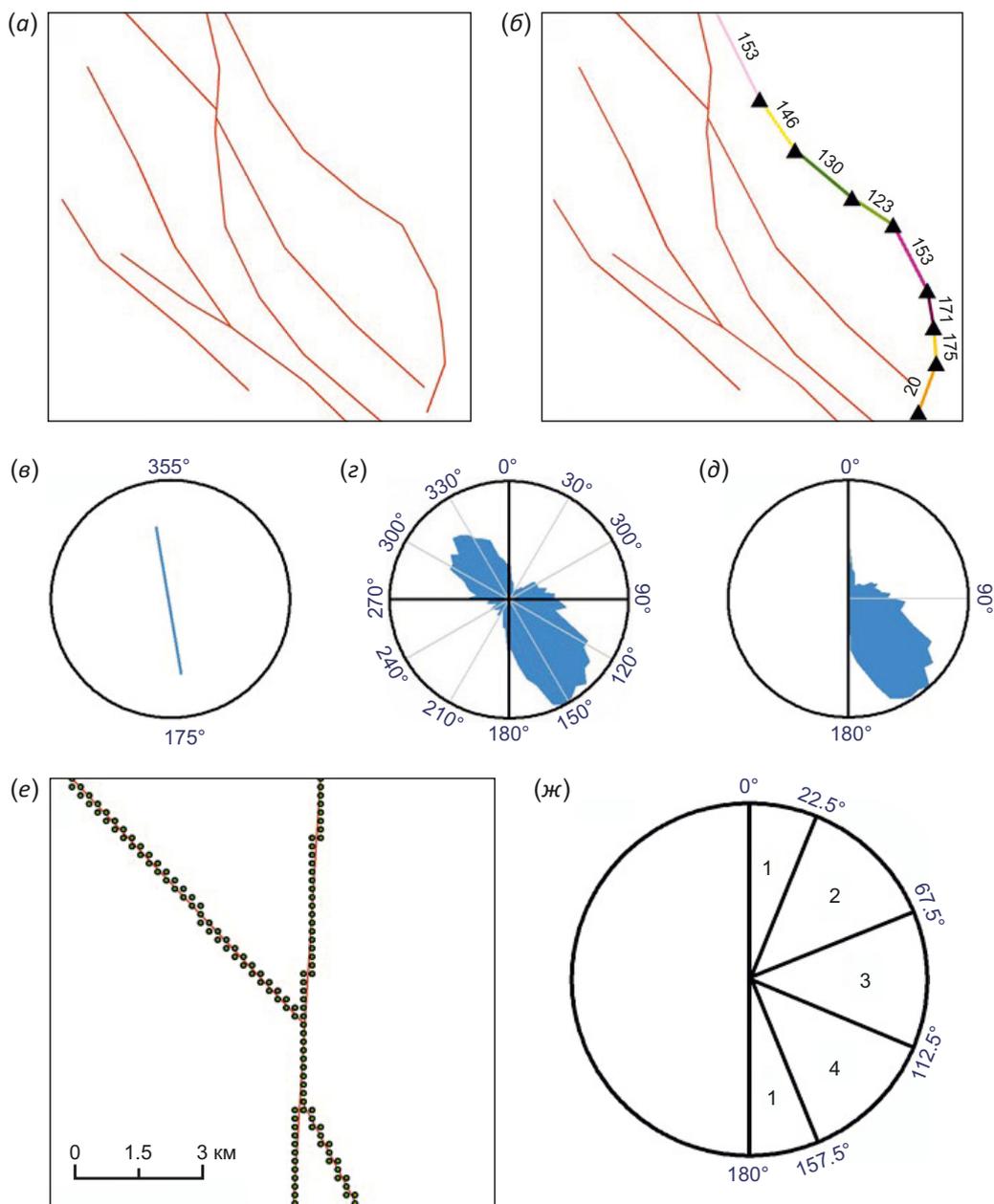


Рис. 3. Трансформация криволинейных элементов в отрезки. (а) – исходные разломы; (б) – разломы, «разбитые» на прямолинейные отрезки с нанесенными азимутами для каждого из них; роза-диаграммы: (в) – для одиночного разлома простирания 175–355°; (г) – для всех разломов внутри скользящего окна; (д) – для всех разломов внутри скользящего окна на полусфере; (е) – трансформация линейных объектов в наборы точек; (ж) – четыре азимутальных диапазона ориентировки разломов.

Fig 3. Transformation of curvilinear elements into segments. (a) – initial faults; (б) – faults split into straight segments with azimuths plotted for each one; rose charts: (в) – for a single fault with a strike of 175–355°; (г) – for all faults inside the sliding window; (д) – for all faults inside the sliding window on the hemisphere; (е) – transformation of linear objects into sets of points; (ж) – four azimuth ranges of fault orientation.

локализации на изученной территории разломов разного направления. Для каждого сектора растровая модель, отражающая разницу плотностей палеозойских и кайнозойских разломов, была получена инструментом Raster Calculator (калькулятор растров) модуля Spatial Analyst. Для значений пикселей в растре разности плотностей взят модуль. Отрицательные значения в тех случаях, когда густота палеозойских разломов

меньше, чем кайнозойских, переведены в положительные. Модель разницы позволяет выделить те области, где разломы имеют сходную густоту (минимальные значения), и области, где густота разломов разного возраста различается.

На район исследования построены роза-диаграммы и плотностные модели распределения разломов палеозойского и кайнозойского возраста (рис. 4).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из построенных роза-диаграмм видно, что в целом у палеозойских разломов (см. рис. 4, а) основное направление юго-восточное, а у разломов кайнозойского возраста (см. рис. 4, б) доминирует субширотное направление с присутствием некоторого количества разломов с пиками 60, 120, 150°. На плотностных моделях четко проявлены различия в распределении густоты разломов разновозрастных генераций: для палеозойских максимум плотности сконцентрирован в протяженной области юго-восточной ориентации (см. рис. 4, в), а для кайнозойских характерна концентрация плотностей, вытянутая с юго-запада на северо-восток (см. рис. 4, г). Область максимальных концентраций разломов кайнозойского возраста в современном орографическом плане приблизительно соответствует региональному водоразделу между бассейном Ледовитого океана и бессточными бассейнами Центральной Азии. Руководствуясь принципом актуализма, можно предположить, что зона максимальной густоты разломов палеозоя также соответствовала региональному водоразделу того возраста. Соответственно, в позднем палеозое и мезозое региональный водораздел в современных координатах имел юго-восточное простирание

и протягивался с северо-запада на юго-восток через территории Горного и Монгольского Алтая.

Построенные плотностные модели распределения разломов субмеридионального, северо-восточного, субширотного и юго-восточного направлений для разломных сетей позднепалеозойского и позднекайнозойского возраста позволяют объективно оценить параметры их сходства и различия (рис. 5). Для позднепалеозойской системы разломов наиболее характерно юго-восточное направление, которое равномерно прослеживается с северо-запада на юго-восток на всем протяжении Горного и Монгольского Алтая. Оно практически не представлено в пределах Западного Саяна и Танну-Ола. Субмеридиональное и субширотное направления локально представлены в Горном и Монгольском Алтае и в пределах Танну-Ола.

Элементы унаследованности проявлены для субмеридионального и северо-восточного направлений в Западном Саяне и на его границе с Горным Алтаем, а для юго-восточного направления – в пределах Монгольского Алтая. Основными направлениями разрывных нарушений для кайнозойской системы являются субширотное и юго-восточное с пересечением полей максимальной плотности на стыке Горного, Монгольского

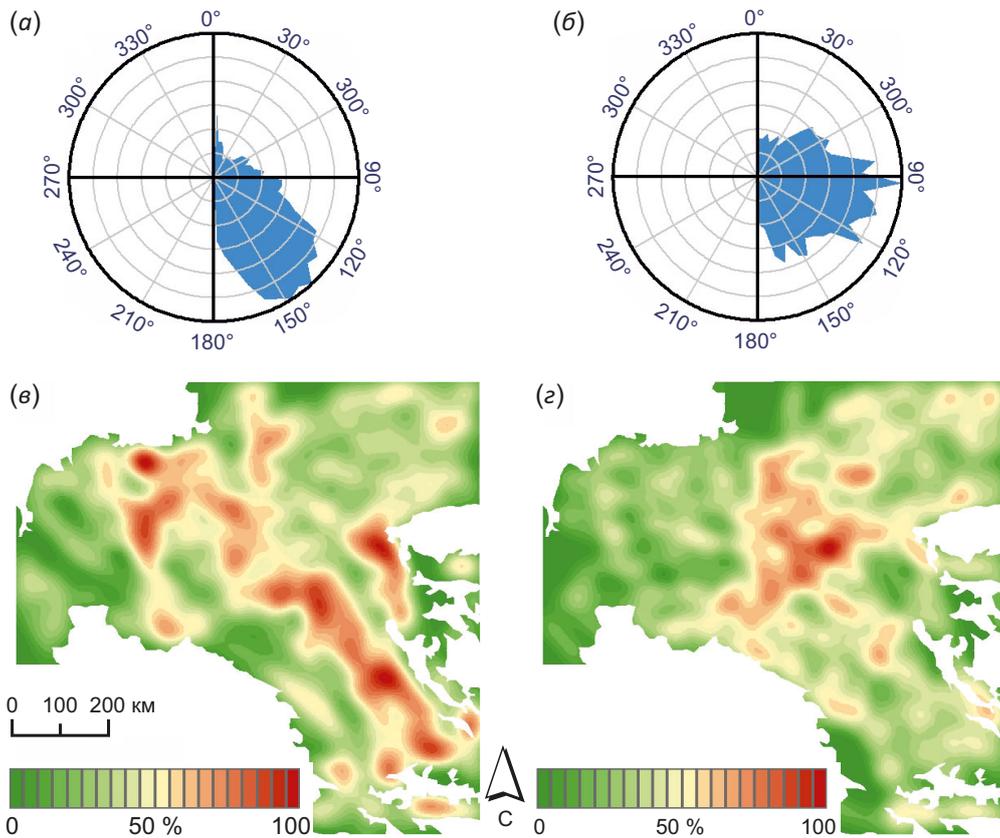


Рис. 4. Плотностные модели разломов.

(а) – роза-диаграмма палеозойских разломов; (б) – роза-диаграмма кайнозойских разломов; (в) – плотностная модель палеозойских разломов; (г) – плотностная модель кайнозойских разломов.

Fig. 4. Density models of faults.

(а) – rose diagram of Paleozoic faults; (б) – rose diagram of Cenozoic faults; (в) – density model of Paleozoic faults; (г) – density model of Cenozoic faults.

Алтая и Танну-Ола. Картина разницы плотностей позднепалеозойских и позднейкайнозойских разломов по основным направлениям показывает высокое совпадение по всем направлениям кроме основного – юго-восточного. При этом для юго-восточного направления область максимальных отклонений распадается на два ареала, локализованных в пределах центральных частей Горного и Монгольского Алтая.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Плотностные модели распределения палеозойских и кайнозойских разломов по разным направлениям показывают определенный элемент сходства. Оно связано с наличием доминирующего юго-восточного направления как в палеозойской, так и в кайнозойской системе. При этом высокая разница плотностей разломов (рис. 5, м) показывает совпадение направления, а

не самих линий разломов. Таким образом, речь идет о новообразовании разломов в кайнозое с сохранением направления, а не об обновлении палеозойских разломных зон. Реактивация палеозойских разломов в кайнозое также иногда имеет место, но лишь на отдельных сегментах.

На рис. 6 проиллюстрированы детальные участки и роза-диаграммы приуроченные к ним разломов разного возраста. Участки выбраны для областей низкой плотности разломов (западный участок) и высокой плотности (восточный участок). В западной области разломы палеозойского и кайнозойского возраста отличаются по направлениям (рис. 6, б, г): для палеозоя здесь характерны юго-восточные направления, для кайнозоя же – субширотные. Восточный участок (рис. 6, в, д) имеет схожую ориентацию разломов – 120–150°.

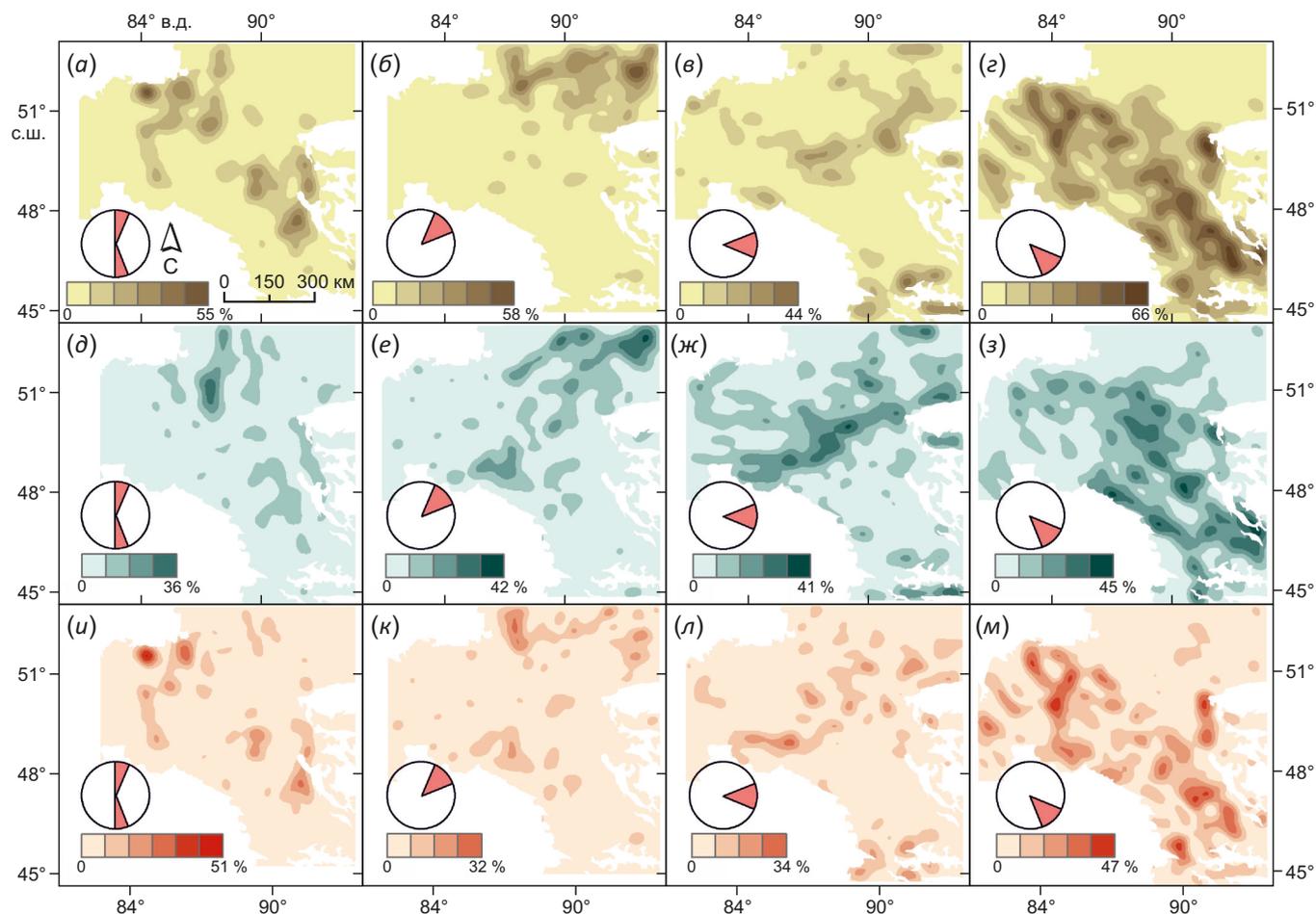


Рис. 5. Плотностные модели по секторам.

(а) – палеозой, сектор 1; (б) – палеозой, сектор 2; (в) – палеозой, сектор 3; (г) – палеозой, сектор 4; (д) – кайнозой, сектор 1; (е) – кайнозой, сектор 2; (ж) – кайнозой, сектор 3; (з) – кайнозой, сектор 4; (и) – разница плотностей палеозоя и кайнозоя, сектор 1; (к) – разница плотностей палеозоя и кайнозоя, сектор 2; (л) – разница плотностей палеозоя и кайнозоя, сектор 3; (м) – разница плотностей палеозоя и кайнозоя, сектор 4.

Fig. 5. Density models by sectors.

(а) – Paleozoic, sector 1; (б) – Paleozoic, sector 2; (в) – Paleozoic, sector 3; (г) – Paleozoic, sector 4; (д) – Cenozoic, sector 1; (е) – Cenozoic, sector 2; (ж) – Cenozoic, sector 3; (з) – Cenozoic, sector 4; (и) – difference between the densities of the Paleozoic and Cenozoic, sector 1; (к) – difference between the densities of the Paleozoic and Cenozoic, sector 2; (л) – difference between the densities of the Paleozoic and Cenozoic, sector 3; (м) – difference between the densities of the Paleozoic and Cenozoic, sector 4.

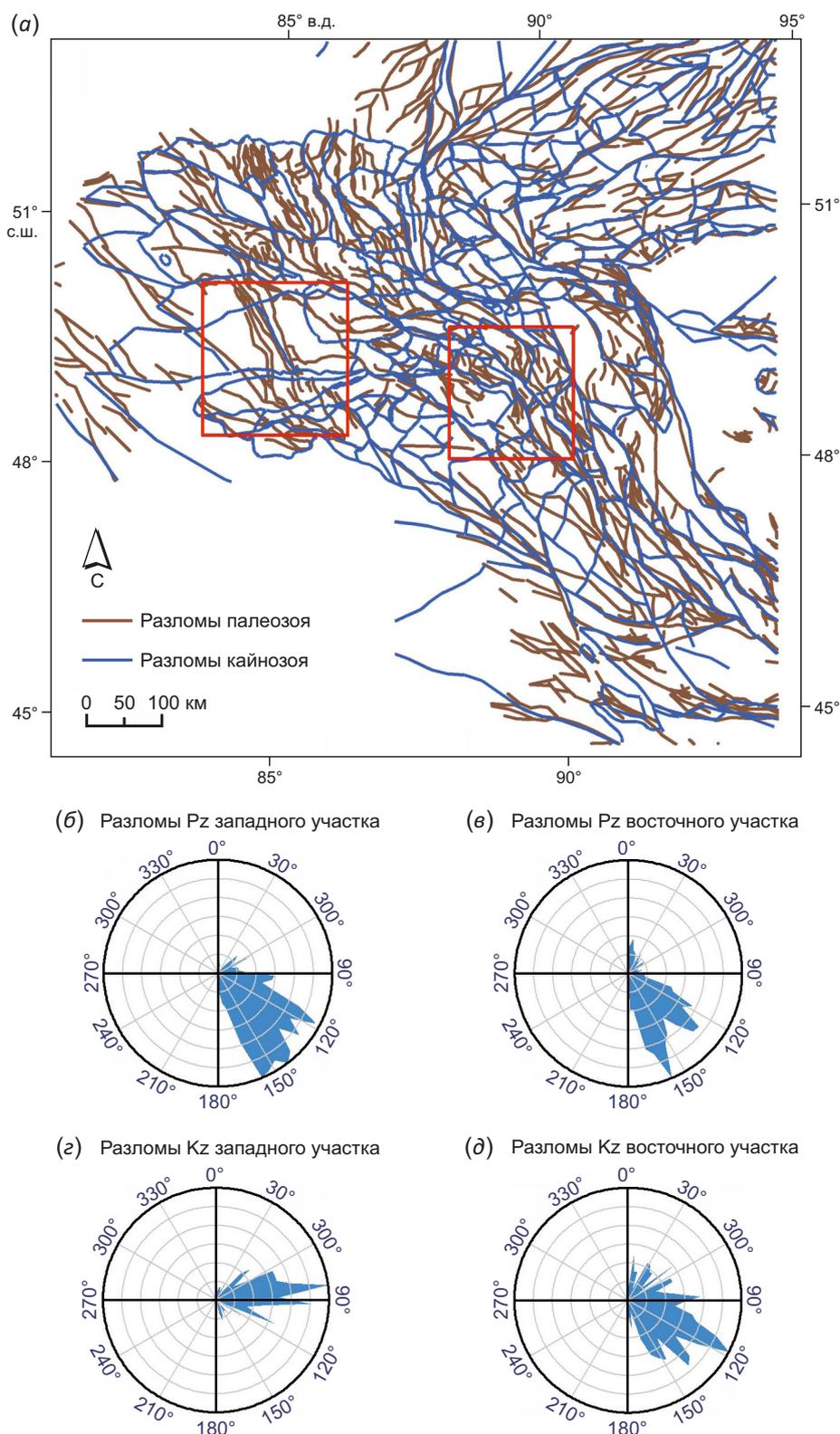


Рис. 6. Построение роза-диаграмм детальных участков.

(a) – расположение детальных участков; (б) – роза-диаграмма разломов палеозойского возраста для западного детального участка; (в) – роза-диаграмма разломов палеозойского возраста для восточного участка; (г) – роза-диаграмма разломов кайнозойского возраста для западного детального участка; (д) – роза-диаграмма разломов кайнозойского возраста для восточного участка.

Fig. 6. Construction of rose diagrams of detailed sections.

(a) – location of detailed sections; (б) – rose diagram of the Paleozoic faults for the detailed western section; (в) – rose diagram of the Paleozoic faults for the eastern section; (г) – rose diagram of the Cenozoic faults for the detailed western section; (д) – rose diagram of the Cenozoic faults for the eastern section.

Наличие одного главного направления разломов с резко подчиненным значением разломов другой ориентации характерно для структурного рисунка сдвиговых зон, где присутствуют протяженные магистральные сдвиги и системы второстепенных разломов оперения. В палеозое и мезозое разломные системы рассматриваемой территории развивались в условиях субширотного (здесь и далее в современной системе координат) сжатия. Палеозойское сжатие связано с закрытием Туркестанского и Джунгаро-Балхашского океанов и аккрецией Казахстанского континентального блока к Сибирскому кратону [Şengör et al., 1993; Windley et al., 2007; Seltnann et al., 2011; Liu et al., 2013; и др.], а мезозойское – с закрытием Монголо-Охотского палеоокеана и коллизией Северо-Китайского кратона с Евразией [Cogné et al., 2005; Donskaya et al., 2013; Yang et al., 2015]. Первое событие происходило к западу, а второе к востоку от рассматриваемой территории; соответственно, оба они генерировали субширотное сжатие. Из двух возможных при субширотном сжатии направлений формирования магистральных сдвигов на большей части территории реализовано юго-восточное, поскольку оно совпадало с основным направлением палеозойских разломов. Лишь на территории Западного Саяна и Танну-Ола было реализовано северо-восточное направление, носившее подчиненный характер. Сдвиговые перемещения этого возраста носили преимущественно левосторонний характер.

Кайнозойская активизация связана с коллизией Евразийской и Индо-Австралийской плит [Tapponnier, Molnar, 1979; Molnar, Tapponnier, 1975]. Соответственно, сжатие рассматриваемой территории было в это время субмеридиональным. Оно обусловило формирование системы правых сдвигов юго-восточного простирания, протягивающейся через Горный и Монгольский Алтай [Novikov, 1998; Novikov et al., 2014]. Таким образом, системы разломов палеозойского и кайнозойского возраста принципиально отличаются кинематически. В первом случае они связаны с магистральными разломами юго-восточного простирания и левосдвиговой кинематики, а во втором – с правосдвиговыми смещениями по магистральным разломам того же простирания, но не по зонам старых разломов, а по параллельным им направлениям. Определенное сходство рисунков разломных сетей связано со сходным общим простиранием главных сдвиговых зон, а различие – с разницей в полях напряжения и, соответственно, с кинематикой основных и оперяющих разломов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С позднего палеозоя по настоящее время в пределах рассматриваемой территории как минимум трижды возникали горные сооружения. Сведения о древних этапах орогенеза мы получаем при интерпретации геологического строения, а о новейшем орогенезе – при морфоструктурных исследованиях. Несмотря на разницу в методах и изучаемых ими объектах, нельзя не отметить значительное сходство в ориентации

и морфологии структур разного возраста. И древние, и новейшие структуры имеют вид веерообразно расходящихся к северо-западу систем и структурный рисунок, характерный для сдвиговых перемещений. Это сходство может приводить к ошибочному заключению о полной унаследованности развития системы кайнозойских разломов западной части Алтае-Саянской складчатой области и их формировании путем реактивации более древних разрывных структур.

Однако это определено не так. Позднепалеозойские движения, сформировавшие основные древние тектонические структуры территории, имели, судя по современным геологическим данным, большие амплитуды горизонтального перемещения, чем мезозойские и кайнозойские. В ходе мезозойского горообразования горизонтальные амплитуды смещений по разломам, фиксируемые по смещению пермокарбонатовых осадочных образований, составляли первые сотни километров [Liu et al., 2013]. В ходе новейшего орогенеза горизонтальные перемещения, фиксируемые по смещению мезозойских образований, составляют лишь первые десятки километров [Novikov et al., 2014].

Можно предположить, что снижение амплитуд горизонтальных перемещений от древних орогенных событий к более молодым связано с поэтапным увеличением прочности земной коры в пределах рассматриваемой территории.

На территории Монгольского Алтая простирания разрывных структур палеозойского основания и новейших разрывных нарушений совпадают и новейшие нарушения нередко обновляют линии древних тектонических контактов, но чаще проходят параллельно им, не совпадая полностью. На территории Горного Алтая картина принципиально иная. Новейшие разрывы используют здесь палеозойские зоны разломов лишь на локальных отрезках, а чаще секут их под разными углами. Такое различие в пространственной позиции разломов палеозойского и кайнозойского возраста связано с тем, что палеозойские структуры имеют продолжение на территорию Бийско-Барнаульской впадины, уходя под ее осадочный чехол, а в кайнозое территория впадины ведет себя как жесткий блок и не подвергается неотектонической активизации.

В тех случаях, когда имеет место полное совпадение линий палеозойских и кайнозойских разломов, это напрямую связано с транспрессионными изгибами, формирующимися на участках пересечения новейшими сдвигами разломных зон палеозойского заложения.

Таким образом, сопряженный анализ ориентировки и пространственного размещения разновозрастных разломов изучаемой территории не подтверждает представление о том, что кайнозойская система разломов формировалась путем реактивации или унаследованного развития палеозойской системы разрывных нарушений. Эти две системы возникали при разных ориентировках сжатия. В палеозое при субширотном сжатии формировался левосдвиговый ансамбль, а в

кайнозой в условиях субмеридионального сжатия – праводвиговой.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что зоны крупных разломов, ограничивающие древние блоки, подновились на неотектоническом этапе развития региона частично (не повсеместно и (или) не на всем своем протяжении), а их внутренняя структура (мелкие, непротяженные разрывы) не всегда совпадает с внутренней структурой разломов палеозоя, т.е. палеозойские разломы часто реактивированы, но не всегда с тем же направлением перемещения крыльев. Последнее связано со сменой направления внешнего тектонического воздействия.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны к.г.-м.н. Ф.И. Жимулеву за консультации по тектонике и региональной геологии.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Agatova A.R., Novikov I.S., Vysotsky E.M., Gibsher A.S., 2004. Geomorphological Affects from 27.09.2003 and 1.10.2003 Earthquakes at Mountain Altai. *Geomorphology* 3, 3–12 (in Russian) [Агатова А.Р., Новиков И.С., Высоцкий Е.М., Гибшер А.С. Геоморфологические эффекты землетрясений 27 сентября и 1 октября 2003 года в Горном Алтае // Геоморфология. 2004. № 3. С. 3–12]. <http://doi.org/10.15356/0435-4281-2004-3-3-12>.

Bogachkin B.M., 1981. *Tectonic Development History of the Gorny Altai in the Cenozoic*. Nauka, Moscow, 132 p. (in Russian) [Богачкин Б.М. История тектонического развития Горного Алтая в кайнозой. М.: Наука, 1981. 132 с.].

Bogolepov V.K., 1967. *Mesozoic Tectonics of Siberia*. Nauka, Moscow, 328 p. (in Russian) [Боголепов В.К. Мезозойская тектоника Сибири. М.: Наука, 1967. 328 с.].

Bogolepov V.K., 1985. *Types of Structural Elements and Crustal Evolution*. Nauka, Novosibirsk, 296 p. (in Russian) [Боголепов В.К. Типы структурных элементов и эволюция земной коры. Новосибирск: Наука, 1985. 296 с.].

Buslov M.M., 1992. *Tectonic Nappes of the Gorny Altai*. Novosibirsk, Nauka, 96 p. (in Russian) [Буслов М.М. Тектонические покровы Горного Алтая. Новосибирск: Наука, 1992. 96 с.].

Cogné J.P., Kravchinsky V.A., Halim N., Hankard F., 2005. *Late Jurassic-Early Cretaceous Closure of the Mongol-Okhotsk*

Ocean Demonstrated by New Mesozoic Palaeomagnetic Results from the Trans-Baikal Area (SE Siberia). *Geophysical Journal International* 163 (2), 813–832. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02782.x>.

Devyatkin E.V., 1965. *Cenozoic Deposits and Neotectonics of the Southeastern Altai*. Nauka, Moscow, 244 p. (in Russian) [Девяткин Е.В. Кайнозойские отложения и неотектоника Юго-Восточного Алтая. М.: Наука, 1965. 244 с.].

Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Ivanov A.V., 2013. *Late Paleozoic – Mesozoic Subduction-Related Magmatism at the Southern Margin of the Siberian Continent and the 150 Million-Year History of the Mongol-Okhotsk Ocean*. *Journal of Asian Earth Sciences* 62, 79–97. <http://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.07.023>.

Geological Map of the Kazakh SSR, 1976. East Kazakhstan Series. Scale 1:500000. Aerogeology, Leningrad, 5 sh. (in Russian) [Геологическая карта Казахской ССР Серия Восточно-Казахстанская. Масштаб 1:500000. Л.: Аэрогеология, 1976. 5 л.].

Geological Map of the USSR, 1980. Scale 1:1000000 (New Series). Sheet M-(44), 45 (Ust-Kamenogorsk). Nedra, Moscow, 1 sh. (in Russian) [Геологическая карта СССР. Масштаб 1:1000000 (новая серия). Лист М-(44), 45 (Усть-Каменогорск). М.: Недра, 1980. 1 л.].

Geological Map of the Western Part of the Altai-Sayan Folded Area, 1977. Scale 1:500000. Aerogeology, Leningrad, 12 sh. (in Russian) [Геологическая карта западной части Алтае-Саянской складчатой области. Масштаб 1:500000. Л.: Аэрогеология, 1977. 12 л.].

Goldin S.V., Seleznev V.S., Emanov A.F., Filina A.G., Emanov A.A., Novikov I.S., Gibsher A.S., Vysotsky E.M. et al., 2004. *The 2003 Chuya (Altai) Earthquake. Materials of the Seismological Study*. In: A.O. Gliko (Ed.), *A Strong Earthquake of September 27, 2003 in Gorny Altai. Materials of the Preliminary Study*. IPE RAS, Moscow, p. 55–60 (in Russian) [Гольдин С.В., Селезнёв В.С., Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Новиков И.С., Гибшер А.С., Высоцкий Е.М. и др. Чуйское (Алтайское) землетрясение 2003 г.: материалы сейсмологического изучения // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г.: Материалы предварительного изучения / Ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2004. С. 55–60].

Jenness J., 2014. *Polar Plots for ArcGIS*. Jenness Enterprises. Available from: http://www.jennessent.com/arcgis/Polar_Plots.htm (Last Accessed November 15, 2022).

Liu D., Jolivet M., Yang W., Zhang Z., Cheng F., Zhu B., Guo Zh., 2013. *Latest Palaeozoic – Early Mesozoic Basin-Range Interactions in South Tian Shan (Northwest China) and Their Tectonic Significance: Constraints from Detrital Zircon U-Pb Ages*. *Tectonophysics* 599, 197–213. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.04.018>.

Molnar P., Tapponnier P., 1975. *Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision*. *Science* 189 (4201), 419–426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>.

Nekhoroshev V.P., 1958. *Geology of Gorny Altai*. Gosgeoltekhizdat, Moscow, 262 p. (in Russian) [Нехорошев В.П. Геология Алтая. М.: Госгеолтехиздат, 1958. 262 с.].

Nekhoroshev V.P., 1966. Tectonics of Altai. Nedra, Moscow, 306 p. (in Russian) [Нехорошев В.П. Тектоника Алтая. М.: Недра, 1966. 306 с.].

Novikov I.S., 1998. The Role of Tectonics in the Evolution of Relief of the Gorny Altai. *Geomorphology* 1, 82–91 (in Russian) [Новиков И.С. Роль тектоники в эволюции рельефа Горного Алтая // Геоморфология. 1998. № 1. С. 82–91].

Novikov I.S., Dyad'kov P.G., Kozlova M.P., Mamedov G.M., Mikheeva A.V., Cherkas O.V., 2014. Recent Tectonics and Seismicity of the Western Altai–Sayan Mountainous Region, Junggar Basin, and Chinese Tien Shan. *Russian Geology and Geophysics* 55 (12), 1441–1451. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.11.008>.

Novikov I.S., Sokol E.V., 2007. Combustion Metamorphic Events as Age Markers of Orogenic Movements in Central Asia. *Acta Petrologica Sinica* 23 (7), 1561–1572.

Novikov I.S., Zhimulev F.I., Pospeeva E.V., 2022. Neotectonic Fault Pattern of the Salair Area (Southern West Siberia): Relation with the Pre-Cenozoic Tectonic Framework. *Russian Geology and Geophysics* 63 (1), 1–12. <http://doi.org/10.2113/RGG20204257>.

Novikov I.S., Zhimulev F.I., Vetrov E.V., Saveliyeva P.Yu., 2019. Mesozoic and Cenozoic Geologic History and Surface Topography of the Northwestern Altai–Sayan Area. *Russian Geology and Geophysics* 60 (7), 781–792. <http://doi.org/10.15372/RGG2019054>.

Obruchev V.A., 1915. The Altai Sketches (Sketch Two). On Tectonics of the Russian Altai. *Zemlevedenie* 3, 1–71 (in Russian) [Обручев В.А. Алтайские этюды (этюды второй). О тектонике Русского Алтая // Землеведение. 1915. № 3. С. 1–71].

Obruchev V.A., 1948. Main Features of Kinetics and Plastics of Neotectonics. *Bulletin of the Academy of Sciences of KazSSR. Geological Series* 5, 13–24 (in Russian) [Обручев В.А. Основные черты кинетики и пластики неотектоники // Известия АН КазССР. Серия геологическая. 1948. № 5. С. 13–24].

Seltmann R., Konopelko D., Biske G., Divaev F., Sergeev S., 2011. Hercynian Post-collisional Magmatism in the Context of Paleozoic Magmatic Evolution of the Tien Shan Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences* 42 (5), 821–838. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.08.016>.

Şengör A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S., 1993. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Paleozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature* 364, 299–307. <https://doi.org/10.1038/364299a0>.

Tapponnier P., Molnar P., 1979. Active Faulting and Cenozoic Tectonics of the Tien Shan, Mongolia, and Baykal Regions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 84 (B7), 3425–3459. <https://doi.org/10.1029/JB084iB07p03425>.

Tschihatceff P.A., 1845. *Voyage Scientifique dans L'Altai Oriental et Les Parties Adjacentes de La Frontière de Chine*. Vol. 2. Gide, Paris, 466 p.

Windley B.F., Alexeiev D., Xiao W., Kröner A., Badarch G., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society of London* 164 (1), 31–47. <http://doi.org/10.1144/0016-76492006-022>.

Yang Y.T., Guo Z.X., Song C.C., Li X.B., He S., 2015. A Short-Lived but Significant Mongol–Okhotsk Collisional Orogeny in Latest Jurassic – Earliest Cretaceous. *Gondwana Research* 28 (3), 1096–1116. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.09.010>.